

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dean Novosel

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:
Dean Novosel

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dean Novosel**

Mat. br.: 0035168365

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROŠENJE MLAZNICE ZA PJESKARENJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR OF NOZZLE FOR SAND BLASTING**

Opis zadatka:

Pjeskarenje je postupak kojim se pod djelovanjem mlaza abrazivnog pijeska povećava hrapavost površine, oblikuje površina ili se površina čisti od nečistoća. Uz trošenje elementa na čiju površinu djelujemo, troše se i dijelovi uređaja za pjeskarenje.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Pronaći jedan konkretni slučaj trošenja mlaznice za pjeskarenje
- 2) Opisati tribosustav te navesti mehanizme trošenja
- 3) Analizirati tragove trošenja
- 4) Identificirati materijal mlaznice
- 5) Provesti prateća ispitivanja
- 6) Analizirati rezultate i dati zaključak

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

P. Grilec

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Z. Kunica

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stećenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem profesoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnoj pomoći u izradi ovog rada i kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama, koje sam upoznao tijekom studiranja, na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Dean Novosel

U Zagrebu, 30. lipnja 2013.

Sadržaj

Popis oznaka	I
Popis slika	II
Popis tablica	III
SAŽETAK	IV
1 UVOD	1
2 UREĐAJ ZA PJESKARENJE	2
2.1 Pištolj za pjeskarenje	2
2.2 Sredstvo za pjeskarenje	3
2.2.1 Kvarcni pijesak	3
2.2.2 Grit	7
2.2.3 Korund- smeđi i crni	7
2.2.4 Čelična sačma	8
2.2.5 Garnet.....	9
3 TRIBOLOGIJA	11
3.1 Elementi tribosustava	11
3.2 Tribosustav koji djeluje u ovom slučaju	12
3.2.1 Abrazija.....	15
3.2.2 Umor površine	17
4 EKSPERIMENTALNI DIO	18
4.1 Konkretni slučaj trošenja mlaznice za pjeskarenje.....	18
4.2 Analiza tragova trošenja.....	19
4.2.1 Skenirajući (scanning) elektronski mikroskop- SEM.....	19
4.3 Identifikacija materijala mlaznice	23
4.3.1 Legure bakra s cinkom-mjedi	23
4.3.2 Hladno gnječene α -mjedi.....	25
4.3.3 Toplo gnječene ($\alpha+\beta$) – mjedi	25
4.3.4 Posebne mjedi	26
4.3.5 Lijeвање mjedi	26
4.4 Mikrostruktura uzorka.....	27

4.4.1	Mikrostruktura	27
4.4.2	Metalografija.....	27
4.5	Priprema uzorka metala za metalografsku analizu.....	27
4.5.1	Metalografska analiza- mikrostruktura materijala mlaznice.....	29
5	ZAKLJUČAK	31
6	POPIS LITERATURE	32

Popis oznaka

F	silu, opterećenje, N
k_{abr}	bezdimenzijska konstanta abrazijskog trošenja
W_x	normalno opterećenje, N
α	faza mikrostrukture (kristala mješanca)
β	faza mikrostrukture (intermetalna faza)
μ	faktor trenja

Popis slika

Slika 1. Pištolj za pjeskarenje [1].....	3
Slika 2. Kvarcni pijesak [2]	6
Slika 3. Grit [3]	7
Slika 4. Korund-smeđi [3] Slika 5. Korund-crni [3]	8
Slika 6. Čelična sačma- okrugla [3] Slika 7. Čelična sačma- lomljena [3]	9
Slika 8. Garnet [3].....	10
Slika 9. Elementi tribosustava [4].....	12
Slika 10. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [4]:.....	16
Slika 11. Pištolj za pjeskarenje	18
Slika 12. Mlaznica za pjeskarenje.....	19
Slika 13. SEM- mlaznica pod povećanjem 34x	21
Slika 14. SEM- mlaznica pod povećanjem 300x	21
Slika 15. SEM- mlaznica pod povećanjem 973x	22
Slika 16. EDS- spektrometar, sastav mlaznice	22
Slika 17. Dijagram stanja Cu-Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b). [8] ..	24
Slika 18. Priprema uzorka metala za metalografsku analizu. [9]	28
Slika 19. Uzorak mlaznice u polimernom kalupu.....	29
Slika 20. Uzorak mlaznice nakon brušenja i poliranja snimljen svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 500x	30

Popis tablica

Tablica 1: Tehničke karakteristike grita [3].....	7
Tablica 2: Tehničke karakteristike korunda [3]	8
Tablica 3: Tehničke karakteristike čelične sačme [3].....	9
Tablica 4: Tehničke karakteristike garneta [3]	10
Tablica 5: Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50 320 i VDI 3822 [5].....	13
Tablica 6: Brušenje	29
Tablica 7: Poliranje	30

SAŽETAK

Čišćenje metalnih površina od hrđe, raznih premaza i drugih nečistoća problem je koji se svakodnevno javlja. Danas postoje razne metode čišćenja, ali daleko najisplativija i najkorištenija metoda je pjeskarenje. Pjeskarenjem se mogu očistiti različite površine koje ne trebaju nužno biti metalne. Pjeskarenjem se može očistiti čak i drvo, plastika i razni slični materijali.

Pošto pjeskarenje djeluje na principu odnošenja površinskog sloja materijala na koji se primjenjuje, nuspojava pjeskarenja je trošenje samih dijelova uređaja za pjeskarenje. Od svih dijelova najviše se troši, moglo bi se reći i jedino, mlaznica za pjeskarenje.

U ovom radu opisano je trošenje mlaznice za pjeskarenje, te je provedeno ispitivanje vrste materijala, mikrostrukture, tragova te vrste trošenja.

UVOD

Pjeskarenje je postupak čišćenja raznih materijala (metal, drvo) do željenog stupnja čistoće određenim abrazivom (kvarcni pijesak, grit, korund) uz pomoć komprimiranog zraka.

Čišćenje metalne površine prije nanošenja zaštitnog premaza, potrebno je učiniti pažljivo, kako bi se metalna površina očistila od masnoće, ostataka korozije i starog premaza.

Pjeskarenje i sačmarenje (čišćenje mlazom abraziva) je jedna od metoda pripreme površine. Čišćenje mlazom abraziva je najbolja metoda ako treba odstraniti slojeve velike debljine produkata korozije, ali i stare premaze, boje itd.

Pjeskarenje je jedini mogući način čišćenja velikih objekata (mostovi, metalne konstrukcije, procesna oprema na otvorenome, brodovi i sl.)

Što je pjeskarenje zapravo? To je generički pojam za proces izgladivanja i čišćenja tvrdih površina čvrstim česticama velike brzine, uz pomoć komprimiranog zraka, čime se željena površina obrađuje do željenog stupnja čistoće.

Pjeskarenjem se čiste metali i nemetali, odnosno ostale površine koje uobičajenim načinima čišćenja nikada ne bi mogle biti očišćene.

Postupkom pjeskarenja površine se čiste, ali i pogrubljuju, što predstavlja zadovoljavajuću osnovu za primjenu zaštitnih sredstava. Hrapavost površine zavisi od materijala koji se koriste za postupak pjeskarenja.

Nuspojava koja se javlja kod pjeskarenja je da uz trošenje elementa na čiju površinu djelujemo, troše se i dijelovi uređaja za pjeskarenje.

1 UREĐAJ ZA PJESKARENJE

Postoji širok asortiman uređaja za pjeskarenje. Dijele se na prijenosne uređaje za pjeskarenje te na zatvorene pjeskarnike.

Prijenosni uređaji za pjeskarenje rade se u različitim veličinama od malih (75 l) sve do više stotina litarskih. Također zatvoreni pjeskarnici mogu biti mali, npr. za pjeskarenje zubi za stomatološke potrebe, sve do velikih zatvorenih hala u kojima se pjeskare kamioni, spremnici i drugo.

U slučaju provedenog ispitivanja u ovom radu riječ je o najjednostavnijem prijenosnom uređaju za pjeskarenje koji se sastoji od kompresora zraka koji ima izlaznu snagu protoka zraka od 250- 300 l/min, te tlači zrak na 6-8 bara. Komprimirani zrak putuje kroz crijevo do pištolja za pjeskarenje koji na sebi ima posudu kapaciteta jedne litre sa sredstvom za pjeskarenje. Stlačena mješavina zraka i sredstva za pjeskarenje (abraziva) izlazi pod velikim pritiskom kroz mlaznicu pištolja i abraziv udara (pod određenim kutem) površinu koja se čisti od različitih nečistoća: hrđe, boja ili raznih premaza.

1.1 Pištolj za pjeskarenje

Pištolj za pjeskarenje sastoji se ulaza komprimiranog zraka koji putuje do ventila koji se ručno otvara te u pištolju za pjeskarenje stvara vrtložni mlaz zraka i sredstva za pjeskarenje koji pada na površinu pod kutem te se na taj način bombardiranjem čestica čisti željena površina.

Regulacija izlaznog omjera zraka i sredstva za pjeskarenje vrši se na mlaznici koja se nalazi na samom izlazu pištolja.



Slika 1. Pištolj za pjeskarenje [1]

1.2 Sredstvo za pjeskarenje

Pod sredstva za pjeskarenje spadaju različiti abrazivni materijali od kojih je najpoznatiji kvarcni pijesak.

1.2.1 Kvarcni pijesak

Osnovni sastojak čistog kvarenog pijeska je SiO_2 . Kvalitetni kvarcni pijesci trebaju sadržavati minimalno 97% SiO_2 .

Ovisno o predmetu koji se pjeskari odabire se i kvarcni pijesak različite granulacije:

a) SUŠENI KREMENI PIJESAK 100 – 0,1/1 mm

(srednja veličina zrna: 0,22 mm)

Primjena:

- fino pjeskarenje (metal, drvo, kamen)
- izrada kalupa (obojeni lijev)
- graditeljstvo
- završni radovi
- kemijska industrija
- izrada izolacijskih materijala

b) SUŠENI KREMENI PIJESAK 110 – 0,1/1,2 mm

(srednja veličina zrna: 0,30 mm)

Primjena:

- pjeskarenje
- održavanje i sanacija igrališta s umjetnom travom

c) SUŠENI KREMENI PIJESAK 130 – 0/1 mm

(srednja veličina zrna: 0,18 mm)

Primjena:

- graditeljstvo
- ljepila za pločice
- punila
- izrada masa za izravnanje podova
- fini završni radovi
- fugiranje
- postavljanje stupova u vinogradu i voćnjaku
- postavljanje tlakavaca
- održavanje i sanacija terena s umjetnom travom

d) SUŠENI KREMENI PIJESAK 199 – 0,3/1,5 mm

(srednja veličina zrna: 0,58 mm)

Primjena:

- pjeskarenje
- izrada golf terena
- igrališta s travom
- igrališta s umjetnom travom

e) SUŠENI KREMENI PUDER 210 – 0/0,1 mm

(srednja veličina zrna: 0,120 mm)

Primjena:

- kemijska industrija
- izrada ljepila za pločice

f) SUŠENA KREMENA SIPINA 227 – 0/2 mm

(srednja veličina zrna: 1,20 mm)

Primjena:

- pjeskarenje (metal, drvo, kamen)
- filteri
- graditeljstvo
- završni radovi

g) SUŠENA KREMENA SIPINA 240 – 0/3 mm

(srednja veličina zrna: 0,78 mm)

Primjena:

- pjeskarenje
- graditeljstvo
- izrada površina industrijskih hala
- metalna industrija [2]



Slika 2. Kvarcni pijesak [2]

Zbog kancerogenosti sitnih kvarcnih čestica pomiješanih sa zrakom, kvarcni pijesak sve više istiskuju druga sredstva za pjeskarenje:

1.2.2 Grit

Grit ima vrlo visoku čvrstoću i abrazivnost. Granule grita su oštre i ivičaste. Prilikom pjeskarenja ovim abrazivom postiže se ravnomjerno hrapava i oštra površina (emajliranje, metalizacija ...). Koristi se kod pjeskarenja pod visokim tlakom u otvorenim i zatvorenim prostorima. S gritom se odstranjuju hrđa, kamenac, boja i druge nečistoće s čeličnih ili drugih tvrdih površina. Osim što se koristi za čišćenje upotrebljava se i za postizanje većeg profila površina. To je idealna priprema površine prije nanošenja zaštitnog premaza.[3]



Slika 3. Grit [3]

Tablica 1: Tehničke karakteristike grita [3]

Svojstva:	Oblik	Oštar i ivičast
	Boja	Crna
	Tvrdoća	>7 Mohs
	Specifična gustoća	3,4-3,8 g/cm ³
	Rasuta gustoća	± 2 kg/dm ³
Kemijski sastav:	SiO ₂	24 - 34 %
	Al ₂ O ₃	4 - 8 %
	Fe ₂ O ₃	40 - 50 %
	CaO	1 - 8 %
Granulacija:	0.25 – 2.80 mm	

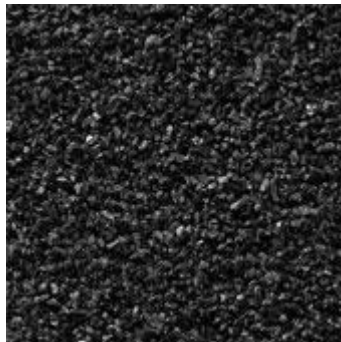
1.2.3 Korund- smeđi i crni

Aluminij oksid je vrlo tvrd, žilav, abrazivan i izuzetno oštar materijal. Zrnca su ivičasta i izuzetno oštra. Kvaliteta korunda ovisi o sadržaju.

Al_2O_3 (od 20 - 96%). Od svih poznatih materijala pjeskarenje korundom je najučinkovitije. To je ekološki materijal jer ne sadrži silikate. Životni vijek korunda je vrlo velik i doseže 20 do 30 ciklusa. Zbog iznimno velike abrazivnosti lako se pjeskari i pod manjim pritiskom zraka (max. 4 bara), što pogoduje velikim uštedama energije u odnosu na pjeskarenje kvarcnim pijeskom ili metalnim abrazivima. [3]



Slika 4. Korund-smeđi [3]



Slika 5. Korund-crni [3]

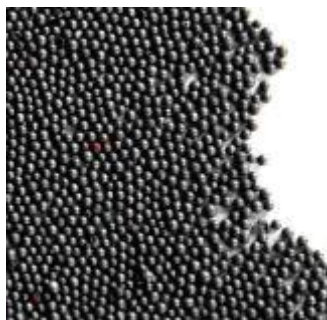
Tablica 2: Tehničke karakteristike korunda [3]

Svojstva:	Oblik	Ivičast
	Boja	Smeđa, Siva
	Tvrdoća	9 Mohs
	Specifična gustoća	$\pm 5,5 \text{ g/cm}^3$
	Rasuta gustoća	$\pm 2,2\text{-}3,0 \text{ g/cm}^3$
Kemijski sastav:	Al_2O_3	95,10 %
	TiO_2	2,50 %
	Fe_2O_3	0,15 %
	SiO_2	0,95 %
	MgO	0,51 %
	CaO	0,46 %
	Na_2O	0,18 %
	K_2O	0,15 %
Granulacija:	0,12 – 2,00 mm	

1.2.4 Čelična sačma

Kuglice čelične sačme mogu biti okruglog oblika ili lomljene. Izdržljive su, teške i izuzetno tvrde. Koriste se kod pjesakrenja pod tlakom u otvorenim i zatvorenim prostorima. Prije pjeskarenja površina se mora očistiti i odstraniti sve površinske čestice. Posebno je prikladno

za čišćenje i pripremu metalnih i betonskih površina. [3]



Slika 6. Čelična sačma- okrugla [3]



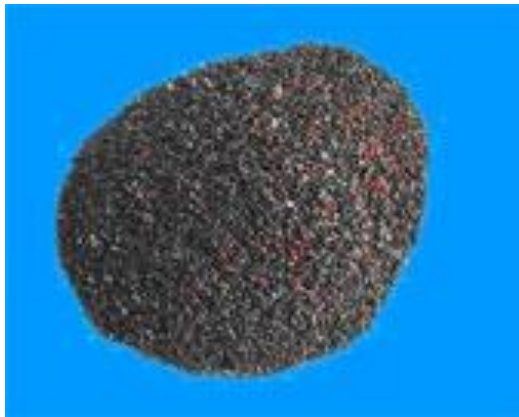
Slika 7. Čelična sačma- lomljena [3]

Tablica 3: Tehničke karakteristike čelične sačme [3]

Svojstva:	Oblik	okrugli	lomljeni
	Boja	crna	crna
	Tvrdoća	43-48 HRc	min 60 HRc
	Specifična težina	do 7,5 kg/dm ³	do 7,5 kg/dm ³
	Opterećenje po 1 kg	420–448 HV	480–550 HV
Kemijski sastav:	C	0,85-1,2 %	0,85-1,2 %
	S	max 0,04 %	max 0,04 %
	P	max 0,04 %	max 0,04 %
Granulacija:		0,40–2,40 mm	0,18–2,00 mm

1.2.5 Garnet

Garnet je ivičast, kompaktan, tvrdi abraziv mineralnog porijekla. Mljeven je i separiran iz posebne vrste kamena po imenu Garnet. U odnosu na druge abrazive mineralnog ima prednost jer stvara manje prašine i ima veću trajnost materijala. Koristi se za čišćenje, hrapavljenje i profiliranje svih vrsta metala i nemetala. [3]



Slika 8. Garnet [3]

Tablica 4: Tehničke karakteristike garneta [3]

Svojstva:	Oblik	Ivičast
	Boja	Crvena, smeđa, siva
	Tvrdoća	7,5-8 Mohs
	Specifična gustoća	4,10 g/cm ³
Kemijski sastav:	SiO ₂	35 %
	Al ₂ O ₃	23 %
	Fe ₂ O ₃	33 %
	MgO	7 %
	CaO	1 %
	MnO	1 %
Granulacija:	10-120 mesh	

2 TRIBOLOGIJA

Tribologija je znanstveno-stručna disciplina koja se bavi problematikom trenja i trošenja.

U popularnom izražavanju tribologija uključuje trenje (*friction*), trošenje (*wear*) i podmazivanje (*lubrication*).

Bit tribologije predstavlja razumijevanje prirode postojećih interakcija i rješavanje proizvodnih problema koji su povezani s fenomenima međupovršina materijala u relativnom gibanju. Tribologija obuhvaća osnovne discipline koje opisuju prirodu površina, interakcije, gibanja i materijale. Primijenjene discipline tribologije opisuju utjecaj odabira materijala, obradu površine, podmazivanje površina u primjeni, kao i područje novih istraživanja u nanotehnici.

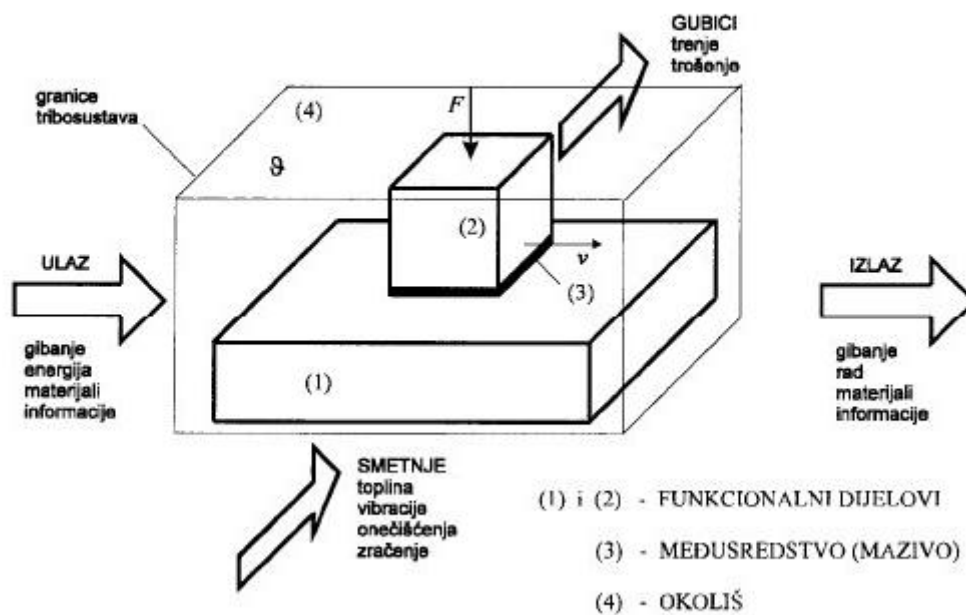
Tribologija je stoga interdisciplinarna znanost gdje su osnovne (fundamentalne) discipline tribologije, koje opisuju osnovnu prirodu površina, interakcije, gibanja i materijale, fizika, kemija, matematika, mehanika fluida, mehanika, znanost o materijalima, metalurgija i strojarstvo. Primijenjene discipline tribologije, koje opisuju efekte odabira materijala, obradbe, podmazivanja i primjene su materijali (metali, polimeri, keramika, 'novi' materijali), obradba materijala (površinski tretmani materijala), podmazivanje materijala (ulja, masti, aditivi), mehaničke konstrukcije (zupčanici, ležaji, klizni elementi), kao i nova istraživanja (nanotehnologije).

Osnovni zadatak tribologije je kontrola ('upravljanje') trenja i trošenja. Tribologija je ključna u modernoj mehanizaciji i u strojarstvu gdje se koriste površine koje se međusobno klizu, kotrljaju ili se kreću relativno jedna u odnosu na drugu.[4]

2.1 Elementi tribosustava

Elementi jednostavnog tribosustava prikazanog na Slici 11. su materijali koji su u kontaktu kod gibanja (1) i (2), uz među-sredstvo (mazivo) (3) kao i djelovanje okoline (4) (kao na pr. korozijsko djelovanje).

Za postizanje optimalnih rezultata kod rješavanja triboloških problema trenja, trošenja i podmazivanja, treba uzeti u obzir opterećenje, F , silu trenja, μ , smjer gibanja, v , ULAZ-IZLAZ protok kroz sustav (gibanje, energija, materijali, informacije), kao i razne SMETNJE i GUBITKE radi trenja i trošenja. Djelatni uvjeti trenja utječu na međupovršinsko trošenje u danom tribosustavu. [4]



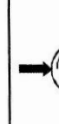
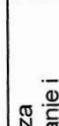


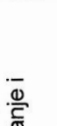



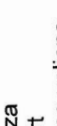
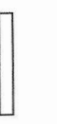
Slika 9. Elementi tribosustava [4]

2.2 Tribosustav koji djeluje u ovom slučaju

Za navedeni slučaj trošenja mlaznice za pjeskarenje podatke o vrsti i načinu trošenja uzimaju se iz tablice 5 koja je napravljena prema normi DIN 50 320 i VDI 3822.

Tablica 5: Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50 320 i VDI 3822 [5]

Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja				Pojavni oblici trošenja (slike istrošenih dijelova)				
					• uglavnom prevladava ○ manje značajno		Adhezija	Abrazija		Umor površine	Tribokorozija		
Kruto tijelo - Medumedij (potpuno razdvajanje filma) - Kruto tijelo	Klizanje, Kotrljanje, Valjanje, Udaranje		Hidrodinamički podmazivani ležaji	-									●
Kruto tijelo - Kruto tijelo (kod suhog, graničnog i mješovitog trenja)	Klizanje		Vodilice, klizni ležaji, čahure, osovine (faza uhodavanja), kuglasti ventili	Klizno		●	○			○	●	Slike A2a-d	
	Kotrljanje, Valjanje		Valjkasti ležaji, igličasti ležaji, valjkasti ležaji, zupčanici, klizne površine bregaste osovine	Kotrljajuće, Valjno		○	○			○	○	Slike A3a-h	
	Vibriranje		Udarne opruge, sjedišta opruga, teleskopske opruge, uzbudne opruge	Trošenje vibriranjem (izjedanje - fretting)			●	●			●	●	Slike A4a-d
	Udaranje		Igle ventila, ventili, udarno opterećeni graničnici	Udarne			○	○			○	○	Slike A5a
Kruto tijelo - Čestice	Klizanje		Udarne ploče na transportnim uređajima	Abrazijsko-udarno	ABRAZIJA						○	○	Slike A6a
			Lopate bagera, svrdla za kamen, lopatice, gusjeničasti pogoni	Abrazijsko-klizno				●	●			○	○

Klasifikacija		Mehanizam		Simbol		Slika	
Kruće tijelo - Kruće tijelo i čestice	Klizanje		Zaprijeti ležaji i vodilice zbog neželjenih procesa	Abrazijsko-tri tijela	○	●	Slika A8a
	Valjanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi, puževi ekstrudera		○	●	Slika A9a
	Udaranje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi		○	●	Slika A9a
Kruće tijelo - Tekućina s česticama	Strujanje		Lopaticice, pumpe, cijevovodi	Hidroabrazijsko	○	●	Slike A11a,b
	Strujanje		Pneumatski transportni uređaji		○	●	Slike A12a,b
Kruće tijelo - Plin s česticama	Strujanje, Udaranje		Uređaji za transport usitnjene ugljena, cementa i žitarica	Trošenje udarom mlaza	○	●	Slika A13a
	Strujanje, Vibriranje		Pumpe, ventilatori, brodski vijci		○	●	Slike A14a-e
Kruće tijelo - Tekućina	Udaranje		Lopaticice parnih turbina	Erozija udarom kapljica	○	●	Slike A15a-c
	Strujanje		Pumpe, ventili, cijevovodi		○	●	Slike A16a,b
Kruće tijelo - Plin	Strujanje		Ploče za toplinsku zaštitu u plinskim turbinama	Erozija plinom	○	●	Slike A17a,b

Prvo se gleda struktura sustava, te se odabire „Kruto tijelo- Plin s česticama“. Sljedeća stvar koja se gleda je tribološko trošenje, te se tu odabire „strujanje“ kao vrsta tribološkog trošenja. Iz tablice se doznaje da je riječ o kliznom trošenju mlazom čestica, a glavni mehanizmi trošenja koji se javljaju su abrazija i umor površine. Također se javlja još i adhezija i tribokorozija, ali to je manje značajno tako da se to može zanemariti.

2.2.1 Abrazija

Abrazijsko trošenje (*abrasive wear*) nastaje kada neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu pomoću plastične deformacije ili loma. Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama (Slika 20.).

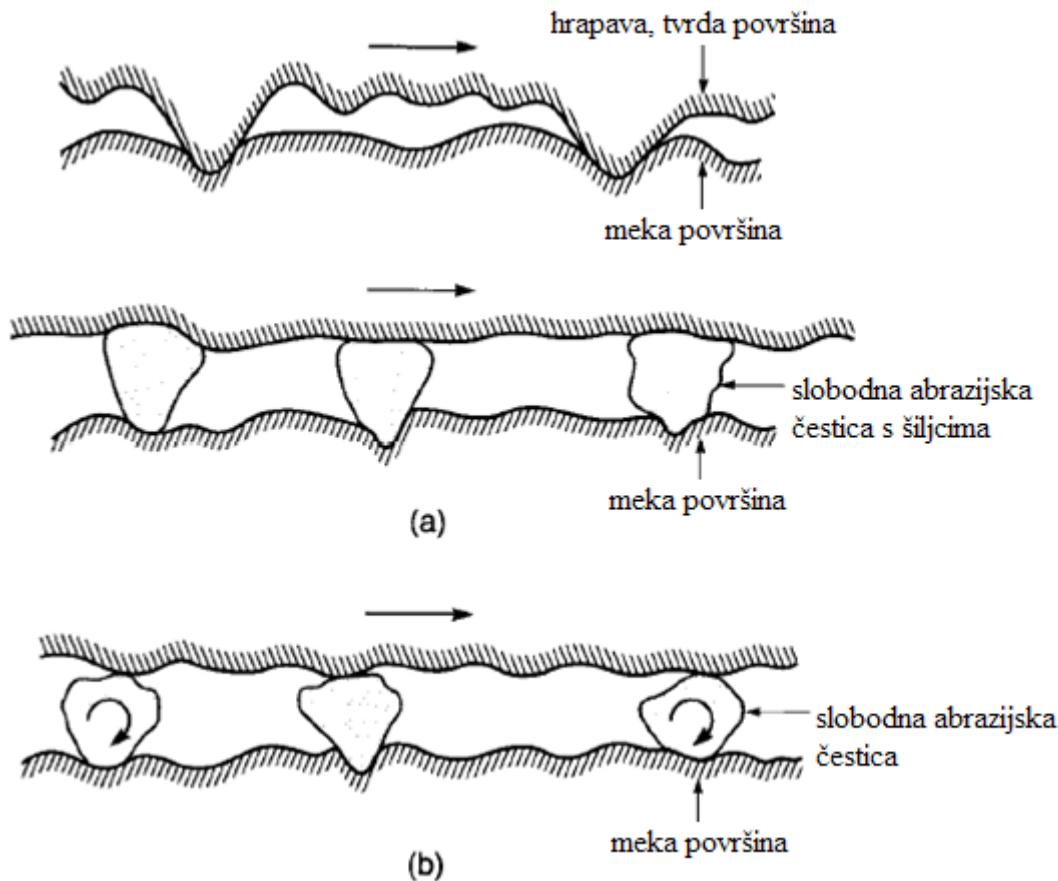
Mehanizmi abrazijskog trošenja djelotvorni su za vrijeme direktnog fizičkog kontakta između dviju površina. Ako su površine odvojene kapljevitim filmom (isključene su abrazijske čestice) ti mehanizmi trošenja ne djeluju.

Kod abrazijskog trošenja u većini situacija dolazi do grebanja i opažaju se brazde na mekšoj površini, koje se vide kao serije utora-žljebova paralelnih s smjerom klizanja. Termini koji se koriste za abrazijsko trošenje su grebanje, zarezivanje s pomoću dijetla ovisno o stupnju djelovanja na površinu.

Jednadžba za adhezijsko trošenje također može pokriti i široko područje abrazijskih situacija:

$$v = \frac{k_{abr} W_x}{H} \quad (19)$$

gdje je k_{abr} bezdimenzijska konstanta abrazijskog trošenja za dani sustav, koja uključuje i geometriju neravnina odnosno hrapavost površine. [4]



Slika 10. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [4]:

- (a) hrapava, tvrda površina ili površina s abrazijskim šiljcima za grebanje klizi po mekšoj površini (operacije brušenja, rezanja);
- (b) slobodna abrazijska čestica s šiljcima koji je smješten između površina od kojih je barem jedna mekša od abrazijske čestice (operacije poliranja).

Utjecaj hrapavosti na volumen abrazijskog trošenja vrlo je izrazit. U uvjetima elastičnog kontakta stvarnih površina u dodiru abrazijsko trošenje opada s porastom hrapavosti površine. U uvjetima plastičnog kontakta brzina abrazijskog trošenja raste s hrapavošću površine. Brzina abrazijskog trošenja mijenja se kao funkcija brzine klizanja i veličine čestica abrazijskog papira. Brzina abrazijskog trošenja često je vrlo velika – dva do tri reda veličine veća od adhezijskog trošenja.

Eksperimenti pokazuju da je brzina trošenja sustava s dva tijela općenito obrnuto proporcionalna tvrdoći i da je proporcionalna normalnom opterećenju i udaljenosti kod klizanja za mnoge čiste metale; svojstva legura puno su kompleksnija. [4]

2.2.2 *Umor površine*

Umor površine i potpovršina (dubinska površina) javlja se za vrijeme cikličkih promjena naprezanja: ponovljenog kotrljanja (*rolling*) odnosno ponovljenog klizanja (*sliding*). Ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja kojima se materijal podvrgava mogu izazvati stvaranje potpovršine ili površinskih pukotina, koje na kraju, nakon kritičnog broja ciklusa, mogu rezultirati u prekidu površine i stvaranju velikih fragmenata, ostavljajući velike jame. Prije te kritične točke nakon više ciklusa dolazi do zanemarivog trošenja, što je suprotno od mehanizama trošenja uzrokovanog adhezijskim ili abrazijskim trošenjem, gdje trošenje izaziva postupnu istrošenost od početka kretanja.

Količina materijala koja se ukloni kod trošenja umorom nije korisni parametar za procjenu. Relevantniji faktor za procjenu trošenja umorom je broj ciklusa ili vrijeme prije nego se dogodi popuštanje umorom, izražen kao vijek trajanja/dinamička izdržljivost.

Mehanizam umora djeluje na međupovršini. Površine u kontaktu doživljavaju velika naprezanja koja se prenose na međupovršinu. Maksimum tlačnih naprezanja javlja se na površini a maksimum smičnih naprezanja javlja se na nekoj udaljenosti od površine. [4]

3 EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 Konkretna slučaj trošenja mlaznice za pjeskarenje

Ovdje se radi o problemu trošenja mlaznice na pištolju za pjeskarenje koja je uslijed dugotrajnog rada stradala upravo na način na koji se postupak pjeskarenja primjenjuje za određene površine, tj. došlo je do odnošenja materijala same mlaznice.



Slika 11. Pištolj za pjeskarenje



Slika 12. Mlaznica za pjeskarenje

Da bi se razumjelo na koji način je došlo do samog trošenja mlaznice najprije se mora proučiti tribosustav te mehanizmi trošenja ovog primjera.

3.2 Analiza tragova trošenja

Kako bi bolje utvrdili tragove trošenja na zadanom primjeru mlaznice, komadić mlaznice ispitan je „skenirajućim (scanning) elektronskim mikroskopom“.

3.2.1 Skenirajući (scanning) elektronski mikroskop- SEM

Osnove rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa sastoje se od skeniranja površine ispitivanog uzorka vrlo precizno fokusiranim snopom elektrona. Snop elektrona pobuđuje (izbijaju) elektrone u sastavu atoma uzorka. Energija elektrona iz snopa u izravnoj je proporciji s interaktivno pobuđenim elektronima iz uzorka.

Energije proizašlih elektrona iz uzorka skupljaju se i mjere specijalnim detektorima i uz pomoć mikroprocesora stvara se pseudotrodimenzijska slika i valnih duljina elektrona jedinstven za element koji se nalazi uzorku.

SEM ima izrazitu prednost nad ostalim mikroskopima u području nekoliko osnovnih mjerenja i metoda. Jedna od najuvjerljivijih definitivno je rezolucija – sposobnost da se "vide" veoma mali objekti. Zatim, dubina polja – sposobnost da objekti različite "visine" na

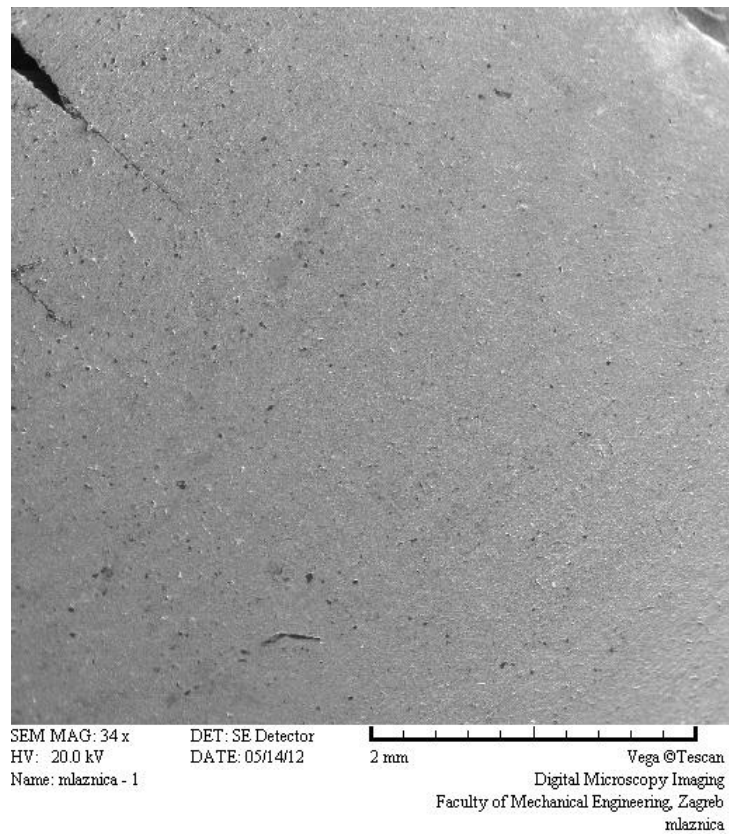
uzorkovnoj površini ostanu u fokusu, te mikroanaliza – sposobnost da se analizira sastav uzorka.

Uzorak se analizira tako da X-zrake nastaju kad ubrzani elektron, uglavnom iz snopa elektrona, "izbije" elektron iz unutarnje ljuske istog atoma. Elektron iz vanjske ljuske, s višom energijom, tada popunjava upražnjeno mjesto i otpušta "višak" energije u obliku fotona X-zrake. Zbog toga što se energija elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki određeni element, energija emitiranog fotona X-zrake karakteristična je za pobuđeni atom.

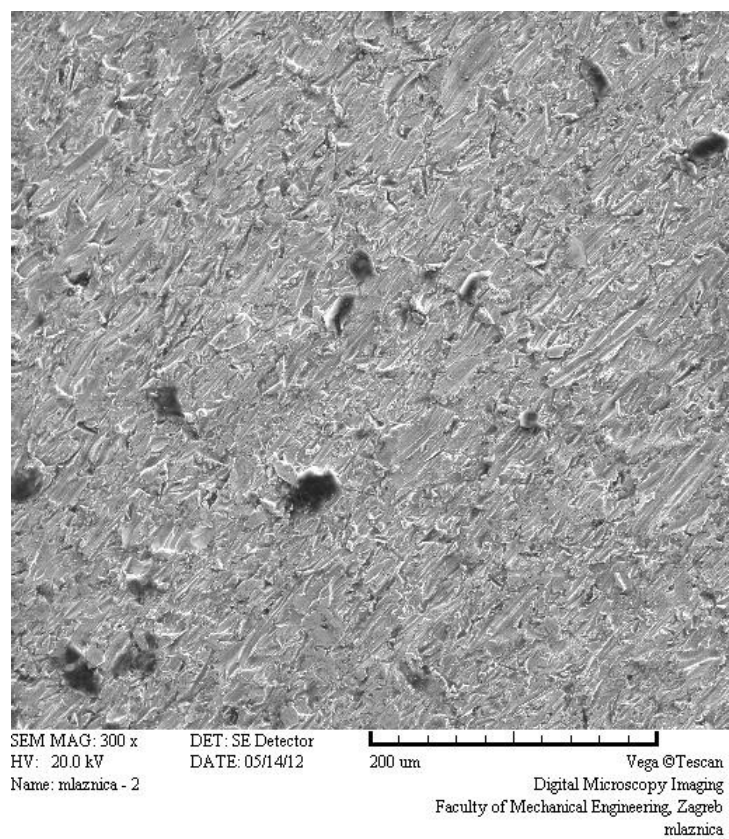
Spektrometar X-zraka prikuplja te karakteristične X-zrake, broji ih i sortira, uobičajeno na temelju energije (Energy Dispersive Spectrometry – EDS). Dobiveni spektar iscrtava broj X-zraka, na okomitoj osi, nasuprot energiji, na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima. Visina vrha energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka.[6]

3.2.1.1 Rezultati SEM-a

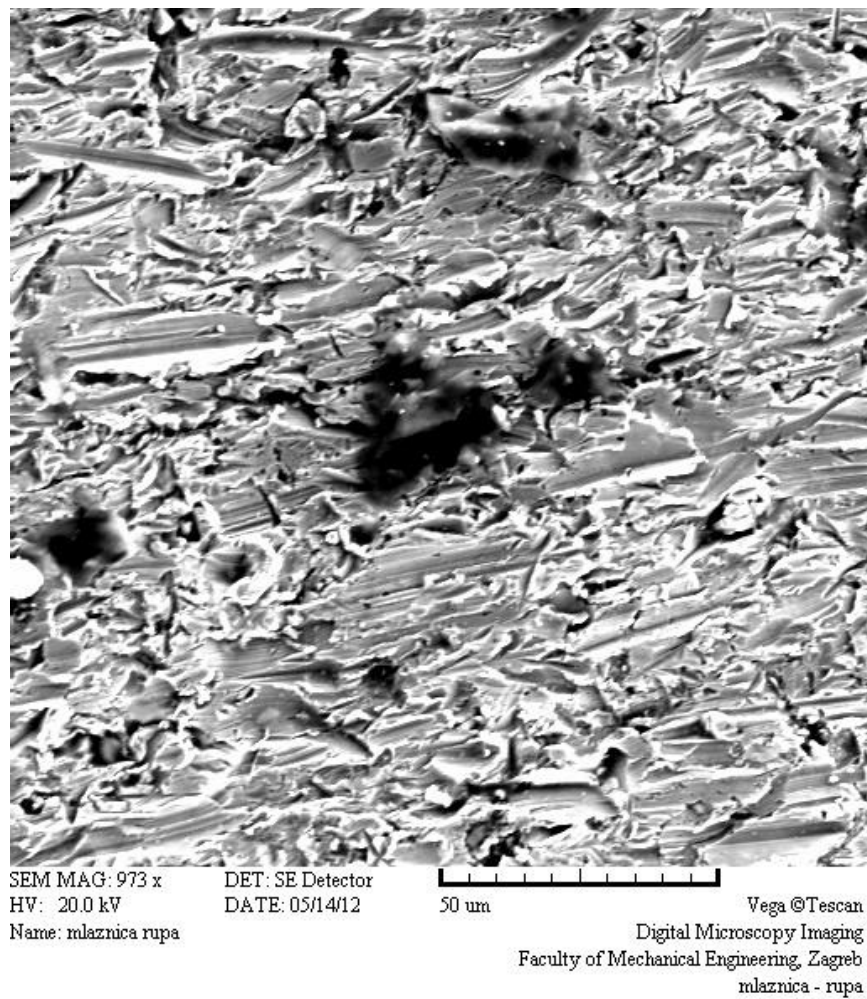
Na temelju dobivenih slika uzoraka pod različitim povećanjem jasno se vide brazde u materijalu koje su posljedica abrazivnog djelovanja čestica za pjeskarenje na samu mlaznicu, te na temelju spektrometra također vidimo od kojih elemenata se sastoji mlaznica.



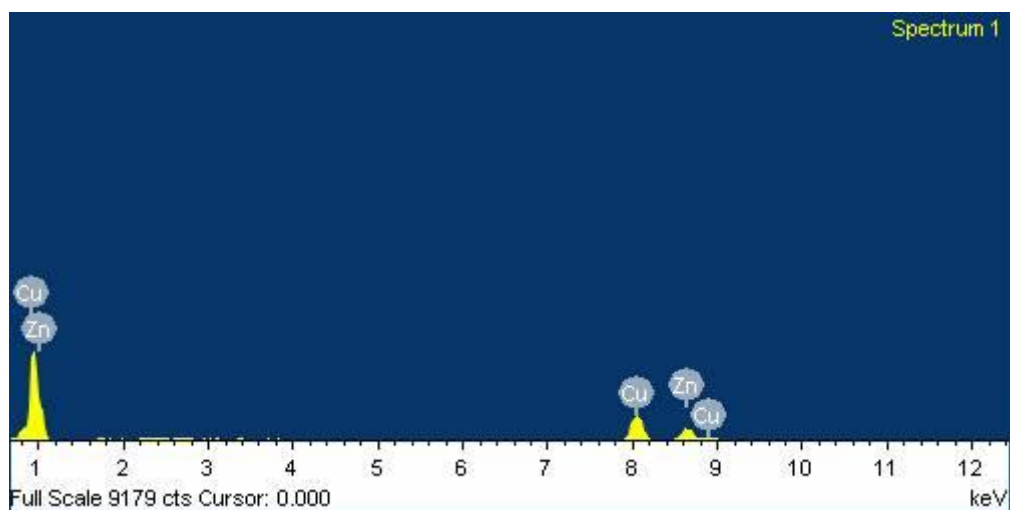
Slika 13. SEM- mlaznica pod povećanjem 34x



Slika 14. SEM- mlaznica pod povećanjem 300x



Slika 15. SEM- mlaznica pod povećanjem 973x



Slika 16. EDS- spektrometar, sastav mlaznice

3.3 Identifikacija materijala mlaznice

Kako bi se detaljno analizirao kemijski sastav mlaznice, uzorak je poslan na analizu u „Laboratorij za analizu materijala“.

Kemijska analiza obavila se sljedećim instrumentom: SPECTRUMAT 750 GDS, LECO. [7]

Ovaj uređaj namijenjen je za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije. Kvalitativnom kemijskom analizom se mogu analizirati svi vodljivi materijali, a laboratorij je opremljen za kvantitativnu analizu nisko legiranih čelika, visoko legiranih čelika, sivog lijeva, nodularnog lijeva, Al-legura i Cu-legura.

Osim navedenog na «Spectrumatu 750 GDS» mogu se analizirati svi slojevi na površini osnovnog materijala dobiveni različitim tehnologijama npr. CVD, PVD, galvanizacija itd. Kemijski elementi koji se mogu analizirati: C, P, S, N, B, Cr, Ni, Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, Si, Nb, V, Ti, W, Sb, Sn, Al, Mg i Pb.

Dimenzije ispitnog uzorka: minimalna površina 17 x 17 mm, minimalna debljina 0,5 mm. Površina ispitne strane uzorka mora biti ravna i glatka. [7]

Dobiveni rezultati:

Zn.....42%

Pb.....2%

Sn.....0,1%

Fe.....0,18%

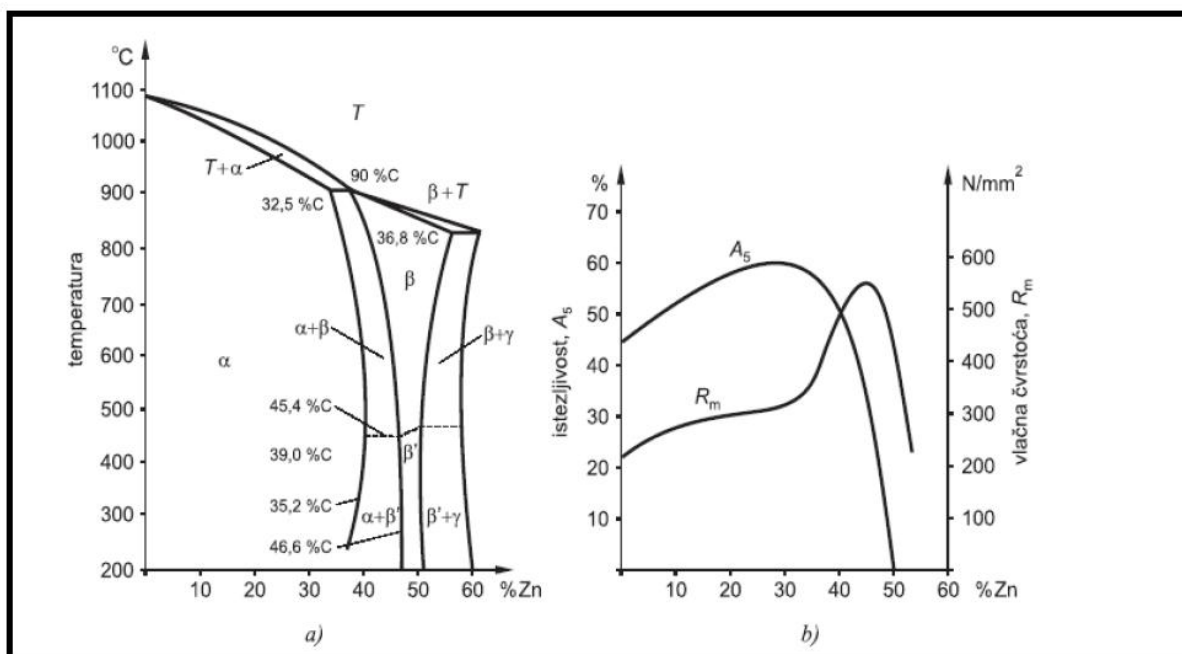
Cu.....ostatak

Iz dobivenih rezultata vidimo da se radi o leguri bakra s cinkom

3.3.1 Legure bakra s cinkom-mjedi

Glavne legure bakra s cinkom, mjedi, najrasprostranjenije su legure bakra s vrlo raznolikom primjenom koja slijedi na osnovi slijedećih svojstava: dobre električne i toplinske vodljivosti, dobrih mehaničkih svojstava, mogućnosti prerade u hladnom i toplom stanju i antikorozivnosti. Vezu između mikrostrukture i mehaničkih svojstava mjedi može se pratiti

usporedbom ravnotežnog dijagrama stanja Cu – Zn i dijagrama u kojem je prikazana ovisnost vlačne čvrstoće i istežljivosti o udjelu cinka.



Slika 17. Dijagram stanja Cu-Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b). [8]

Pri peritektičnoj temperaturi od 902°C bakar otapa do 32,5% Zn. Topljivost raste sa sniženjem temperature do 39%, pri 454°C. Uz vrlo sporo hlađenje, što omogućava postizanje ravnoteže, topljivost cinka u bakru opada do 35,2% pri 250°C. Difuzija cinka je vrlo spora tako da uz industrijske brzine ohlađivanja ostaje na sobnoj temperaturi oko 37% Zn otopljenog u kristalima mješancima bakra. Ta čvrsta otopina označena je kao α .

Porastom udjela cinka u leguri iznad 37% pojavljuje se u mikrostrukтури intermetalna faza β' (sređena struktura) koja odgovara sastavu Cu-Zn. β' - faza je tvrda, ali prilično žilava na sobnoj temperaturi. Zagrijavanjem iznad 454°C prelazi u β oblik (nesređena struktura) koja je oblikovljiva deformiranjem. Nasuprot bakru s FCC i cinku s HCP rešetkom, β' ima strukturu koja se može opisati kao BCC iako to nije potpuno korektno. Naime, tu se radi o dvije vrste atoma dok se pojam BCC odnosi na kristalnu strukturu u kojoj su svi atomi iste vrste. Ovdje se zapravo radi o dvije jednostavne rešetke koje se međusobno isprepliću. U jednoj rešetki u centru je atom bakra, a na uglovima su atomi cinka, dok je u susjednoj rešetki obrnut slučaj. Kako atomi bakra i cinka zaposjedaju fiksne položaje u rešetki, ne dolazi kod skrućivanja do

segregacija. Između 45 i 50% Zn legura je monofazna. Mikrostruktura se sastoji samo od intermetalne faze β' . Daljnji porast udjela cinka iznad 50% dovodi do pojave γ -faze u mikrostrukturi. Ona je vrlo krhka i zbog toga je legura nepovoljna za inženjersku primjenu. Zbog takvih svojstava pojedinih faza tehničke legure ne sadrže više od 44% Zn. (slučaj opisan u ovom radu)

Na osnovi prethodnog razmatranja mjedi se mogu razvrstati na hladno i toplo gnječene (oblikovljive) legure. [8]

3.3.2 Hladno gnječene α -mjedi

Hladno gnječene α -mjedi su po mikrostrukturi jednofazne homogene legure. Primjenjuju se zbog vrlo dobre duktilnosti koja je maksimalna kod 30% Zn. Da se to postigne, legura mora biti visoke čistoće, jer uključci već u vrlo maloj količini znatno smanjuju duktilnost. α -mjedi su poprilično osjetljive na temperaturama žarenja zbog opasnosti od naglog porasta zrna, pa se leguru lako može „spaliti“. Temperature žarenja su do oko 600°C. Ako se leguru pregrije, porast zrna je tako brz da se kod slijedećeg postupka prešanja pojavljuje na površini metala efekt poznat kao „narančina kora“. Zrno tako poraste da je vidljivo bez pomoći optičkih pomagala.

Hladno oblikovane α -mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju. Korozija koja se može javiti uz prisutnost manjih količina amonijaka i vlage, prodire interkristalno budući da su područja uz granice zrna „anodna“ prema njihovoj okolini. Ovaj nedostatak može se ukloniti žarenjem za uklanjanje napetosti na temperaturi od oko 250°C nakon prerade. [8]

3.3.3 Toplo gnječene ($\alpha+\beta$) – mjedi

Toplo gnječene ($\alpha+\beta$) – mjedi su legure sa više od 37% Zn i do 60% Cu i gotovo su potpuno oblikovljive toplom preradom. α -mjedi toplo se oblikuju samo u početnoj fazi oblikovanja. U pravilu se ($\alpha+\beta$) – mjedi oblikuju u toplom stanju u početnim fazama prerade, dok se hladno oblikovanje primjenjuje samo za dobivanje završnih dimenzija i korektnog stupnja očvrnuća za daljnju uporabu.

Smanjena žilavost i heterogenost povoljne su za poboljšanje obradljivosti ovih legura postupcima odvajanja čestica (tokarenje, bušenje, glodanje, blanjanje). Za daljnje poboljšanje obradljivosti odvajanjem čestica legurama se dodaje olovo (1-3%). Ono je netoljivo u mjedi i raspoređeno je u mikrostrukturi u obliku malih kuglica koje uzrokuju lokalni lom za vrijeme rezanja. [8]

Kemijski sastav ispitanog uzorka po svom sadržaju odgovara ovoj vrsti mjedi.

3.3.4 Posebne mjedi

Posebne mjedi se sastoje od 54-62% Cu i do oko 7% drugih elemenata, dok je ostatak cink. Legirani elementi poboljšavaju korozijsku postojanost ili druga svojstva. To su toplo oblikovljive legure, a mogu se primjeniti i u lijevanom stanju. Vlačna čvrstoća im je povećana i na više od 700 N/mm^2 u lijevanom (kokilni lijev) ili kovanom stanju. Dodatkom do 2% nikla, mangana, željeza, aluminija i silicija, pojedinačno i do 1% kositra ujedino se povećava i korozijska postojanost legura. [8]

3.3.5 Ljevane mjedi

Ljevane mjedi imaju u pravilu 36% do 43% Zn i 1% do 3% Pb, a posebne mjedi još i nikla, aluminija, željeza, kositra ili mangana. Posjeduju uski interval skrućivanja i zbog toga ne dolazi do segregacija u zrnju. Ove legure nisu predviđene za hladno oblikovanje zbog heterogene ($\alpha+\beta$) – mikrostrukture (slika), pa se primjenjuju u lijevanom stanju zbog povišene čvrstoće. [8].

Prema kemijskom sastavu možemo zaključiti da kemijski sastav ispitivanog uzorka po svom sadržaju odgovara ovoj vrsti mjedi.

3.4 Mikrostruktura uzorka

Da bi se dobio još bolji uvid u sastav navedenog uzorka izrađenog od mjedi provedeno je još jedno ispitivanje mikrostrukture.

3.4.1 Mikrostruktura

Legure istog sastava (komponenti) mogu imati vrlo različita svojstva - veliku ulogu u tomu ima njihova mikrostruktura

Mikrostruktura legure određena je postupcima dobivanja legure (npr. odljevaka) i postupcima oblikovanja, toplinske obrade i dr.

Mikrostruktura legure opisuje veličinu i oblik kristalnih zrna različitih faza, njihovu orijentaciju i raspodjelu.

3.4.2 Metalografija

Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog (metalografskog) i elektronskih mikroskopa.

-Makrostruktura – vidljiva golim okom ili uz malo povećanje

-Mikrostruktura – zahtijava pomoć mikroskopa

Metalografska analiza može dati informacije o sastavu materijala, prethodnoj obradi i svojstvima, posebno:

- veličinu zrna
- prisutne faze
- kemijsku homogenost
- raspodjelu faza
- deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala
- debljinu i strukturu površinskih prevlaka
- određivanje pukotine i načina loma.[9]

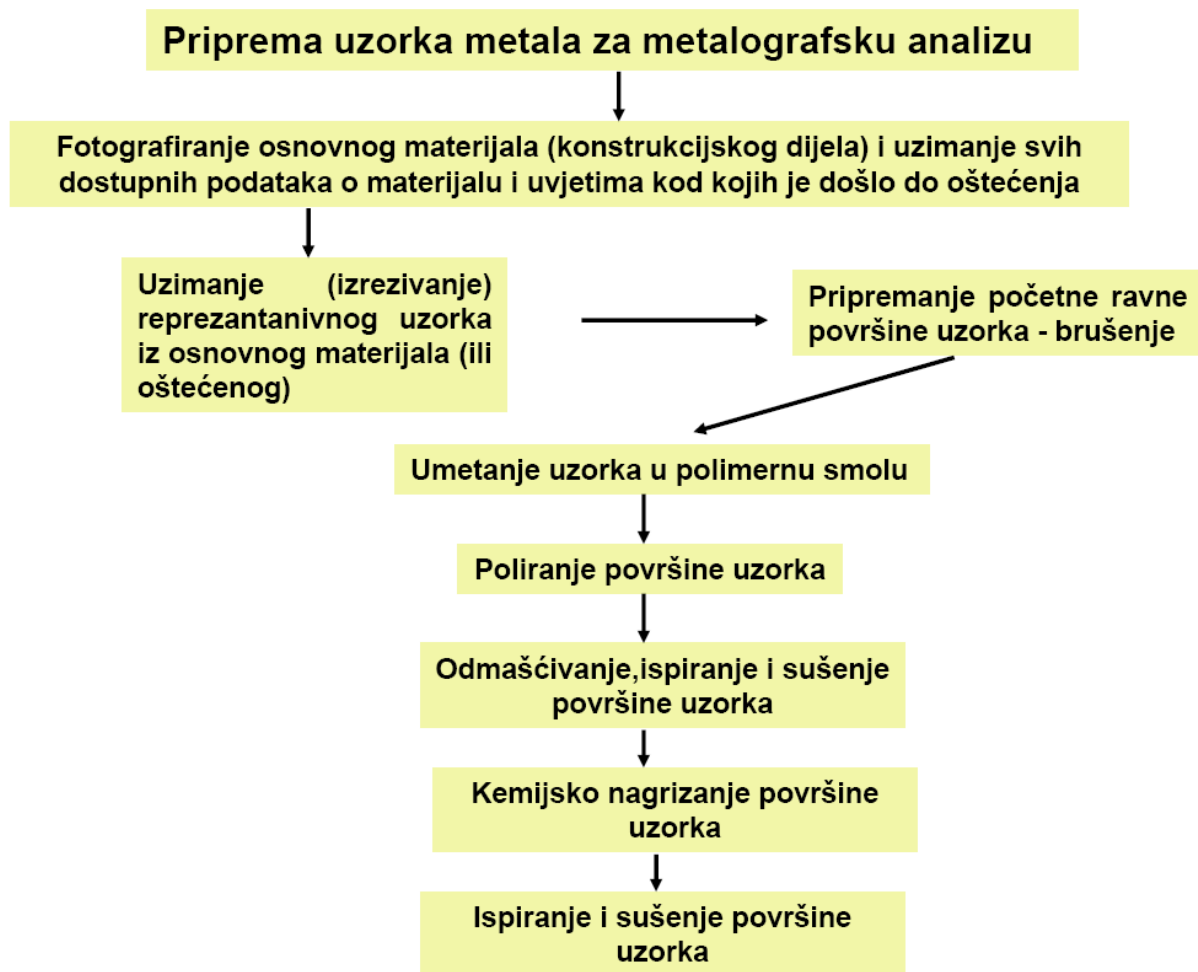
3.5 Priprema uzorka metala za metalografsku analizu

Metalni uzorci ne propuštaju svjetlost.

Za mikroskopiranje uzoraka metala koriste se svjetlosni (metalografski) mikroskopi koji su konstruirani tako da se koristi svjetlo koje pada na površinu uzorka.

Sustavom zrcala i leća u mikroskopu se povećava slika površine metalnog uzorka.

Zbog korištenja reflektiranog svjetla sa površine metalnog uzorka, površina uzorka mora se prije mikroskopiranja temeljito pripremiti.



Slika 18. Priprema uzorka metala za metalografsku analizu. [9]

Kemijskim se nagrivanjem postiže da se glatka, zrcalno sjajna površina uzorka učini vidljivom za mikroskopiranje. Obično se nagriva granice kristalnih zrna (metali i legure su polikristalinični). Sa nagrivanjem površine se svjetlo različito reflektira što u okularu mikroskopa daje sliku zrna, faza itd. [9]

3.5.1 Metalografska analiza- mikrostruktura materijala mlaznice

Izrezani komad uzorka mlaznice za pjeskarenje donesen je u Laboratorij za metalografiju te je tamo pripremljen za gledanje mikrostrukture. Nakon ulijevanja uzorka u kalup (slika 19), te nakon njegovog otvrdnuća uzorak je brušen i poliran prema preporuci dobavljača opreme za pripremu metalografske analize na način koji je prikazan u tablici 6 i 7.



Slika 19. Uzorak mlaznice u polimernom kalupu

Tablica 6: Brušenje

Faza	PG	FG
Baza	SiC- Pan	DS-Pan
Abrazivi	SiC	DS- Suspension
Granulacija zrna	#220	15 μm
Mazivo (podmazivanje)	Voda	Blau
Brzina vrtnje [U/min]	300	150
Pritisak [N]	150	200
Vrijeme [min]	Do glatke površine	5

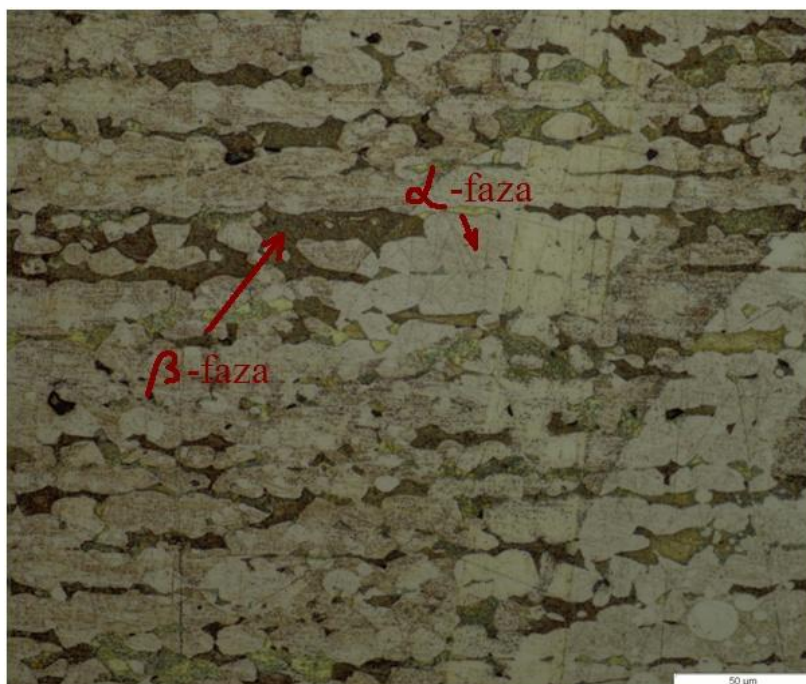
Tablica 7: Poliranje

Faza	DP1	DP2	OP
Baza	DP-Dur	DP- Mol	OP- Nap ili OP-Chem
Sredstvo za poliranje	DP- Suspension	DP- Suspension	OP- S ili OP- U
Granulacija zrna	6 μm	3 μm	-
Mazivo (podmazivanje)	Blau	Rot	-
Brzina vrtnje [U/min]	150	150	150
Pritisak [N]	200	150	50
Vrijeme [min]	4	3	1

-napomena: kod brušenja za hlađenje korištena je voda, a kod poliranja za hlađenje korišteni su lubrikanti „Blau“ i „Rot“.

Nakon brušenja i poliranja uzorak se nagrizao, te se pod svjetlosnim mikroskopom mogla jasno vidjeti njegova mikrostruktura. Nagrizalo se sa sredstvom koje se sastoji od: 60 ml H_2O , 10 gr NaOH te 30 gr K-fericijaniola. nakon toga uzorak je opran u alkoholu.

Iz slike 20, vidi se da je riječ o $\alpha+\beta$ mjedi usmjerene strukture zrna koja može nastati naknadnim postupkom provlačenja.



Slika 20. Uzorak mlaznice nakon brušenja i poliranja snimljen svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 500x

4 ZAKLJUČAK

Kako bi se očistio željeni materijal od starih premaza, hrđe i dr. najčešće se koristi postupak pjeskarenja. To je postupak čišćenja raznih materijala do željenog stupnja čistoće određenim abrazivom uz pomoć komprimiranog zraka. Pjeskarenje i sačmarenje najbolja je metoda pripreme površine ako treba odstraniti slojeve velike debljine produkata korozije, ali i stare premaze, boje itd. Također je jedini mogući način čišćenja velikih objekata (mostova, metalnih konstrukcija, procesne opreme na otvorenome, brodova i sl.).

Kao i svaki drugi alat, kojim se abrazivski djeluje na površinu koja se obrađuje, uz odnošenje materijala obradka troši se i sam dio alata. U ovom slučaju najveće trošenje alata za pjeskarenje spada na mlaznicu pištolja za pjeskarenje. Nemoguće je sasvim smanjiti trošenje alata, ali uz njegovu detaljnu analizu kroz elemente tribosustava, te preko sastava materijala i njegove mikrostrukture dolazi se do puno boljeg uvida zašto se alat troši. Na temelju tih činjenica traži se način (postupak- prevlačenje ili odabir dugog materijala) koji će određenom alatu osigurati dulji vijek trajanja.

5 POPIS LITERATURE

- [1] <http://www.gav.it/cataloghi/catalogo%20aerografi/pistole.pdf>
- [2] <http://www.kukarmetali.hr/hr/sandblasting>
- [3] http://www.bonocom.hr/bonocom/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=78&lang=hr
- [4] V.Kovačević, D. Vrsaljko „Tribologija“ (nastavni materijal), Zagreb, 2011.
- [5] T. Filetin, K. Grilec „Postupci modificiranja i prevlačenja površina“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [6] G. Mršić, S. Žugaj „Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX)” (stručni članak), Zagreb 2007.
- [7] http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/index.php?menu=20&action=4
- [8] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2007.
- [9] L.Pomenić „Mikrostruktura materijala“, predavanja
([http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/nastava/materijali_I/skripta/skripta-lekcija_11\(mtrI\).pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/nastava/materijali_I/skripta/skripta-lekcija_11(mtrI).pdf))